



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



Desenvolvimento de um Sistema para medidas de Refletância

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Mário Salgado Ribeiro (UNIFESP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: mario.ribeiro@unifesp.br

Luiz Angelo Berni (LAS/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: berni@las.inpe.br

Julho de 2013

Resumo

O objetivo deste trabalho é montar um sistema para medição de refletância de materiais a fim de construir uma biblioteca de dados, onde através destas medidas será possível calcular a BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), função que descreve as características direcionais da luz sobre uma superfície. Os dados gerados por este tipo de sistema poderão ser utilizados para obter informações sobre a rugosidade de uma superfície, calcular o índice de refração e extinção de um material, em modelos de iluminação e em análise de luz espúria em sistemas óticos. A parte mecânica é formada por dois braços conectados a motores de passo de 18 Kgf.cm com resolução de $0,4^\circ$ obtidos através de “drives” próprios. O primeiro braço possui uma fonte de luz dicrónica de 50 W, o segundo braço possui lente, espelho e uma fibra ótica que transporta a luz espalhada até um sensor com filtros de interferência acoplados a um amplificador do tipo “lock-in”. Os sinais são transferidos para um sistema de aquisição analógica-digital e enviados para um computador para armazenar e analisar os dados. O sistema atualmente está integrado e um programa desenvolvido em linguagem "C" permite controlar os motores e fazer a aquisição dos dados. Inicialmente o sistema foi caracterizado para determinar o espectro da fonte de radiação, área iluminada e desvios em relação ao centro de medida. Em seguida foram realizadas algumas medidas em amostras de grafite, alumínio anodizado, alumínio e “Spectralon” como padrão de refletância. Também se espera fazer medidas em célula de silício nacional, importada, tripla junção e materiais comuns. Na segunda etapa do projeto, será implementado o eixo azimutal para medidas em 3D.

Abstract

The objective of this work is to build a system to measure the reflectance of materials in order to build a data library, where through these measurements will be possible to calculate the BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function), function that describes directional characteristics over a surface. The data generated by this type of system will be useful to obtain information about roughness of a surface, calculate index of refraction and extinction of a material, in models of illumination and analysis of stray light in optical systems. The mechanical part is formed by two arms connected to step motors of 18 Kgf.cm with resolution of $0,4^\circ$ obtained by specific "drivers". The first arm contains a dichroic light source of 50 W, the second arm contains a lens, mirror and a optical fiber that transport the scattered light to a sensor with interference filters allocated in a "lock-in" amplifier. The signs are transmitted to an analog-digital acquisition system and sent to a computer to store and analyze the data. Currently the system is integrated and a program in "C" language allows control the motors and make the data acquisition. Initially the system was characterized to determinate the spectrum of the radiation source, illuminated area and error about the center of the measurements. Then some measurements were performed in graphite, anodized aluminum, aluminum and "Spectralon" as the reflectance standard. It's expected to make measures with national silicon cell, imported, triple junction and common materials. In the second stage of the project, will be implemented the azimuthal axis to 3D measurements.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
3.1 Ilustração do sistema.....	7
3.2.1 Diâmetro dos spots da lâmpada.....	9
3.2.2 Intensidade da radiação sobre a mesa na direção x.....	9
3.2.3 Intensidade da radiação sobre a mesa na direção y (perpendicular a direção x).....	10
3.2.4 Irradiância da lâmpada para cada comprimento de onda.....	10
3.2.5 Distância entre os centros do spot de observação do detector em relação ao do centro do spot a 0°	11
3.2.6 Diâmetro do spot detector pelo ângulo de reflexão após ajuste.....	12
4.1 Valores típicos obtidos para o Padrão durante as medidas dos diversos materiais.....	13
4.2 Valores para o teste com Grafite.....	14
4.3 Valores para o teste com Alumínio anodizado.....	15
4.4 Valores para o teste com Aço Inox pintado.....	16
4.5 Valores para o teste com Alumínio.....	17
4.6 Valores para o teste com Espelho.....	17

SUMÁRIO

	Pág.	
1	Introdução.....	5
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function).....	5
3	Materiais e Métodos.....	6
3.1	Dispositivos.....	6
3.2	Caracterização do Sistema.....	8
3.3	Metodologia.....	12
4	Análise dos Resultados.....	12
4.1	Perfis de Refletância.....	12
5	Conclusão.....	18
6	Referência.....	18

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe um sistema para medida da BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), uma função que descreve características óticas de um material e sua superfície e é usada para simulações gráficas de superfícies iluminadas. Os dados gerados por este tipo de sistema poderão ser utilizados para obter informações sobre a rugosidade de uma superfície, calcular o índice de refração e extinção de um material, em modelos de iluminação e em análise de luz espúria em sistemas óticos. Assim torna-se necessário construir uma biblioteca com dados sobre superfícies de materiais para comparação e apoio para estas simulações. Porém para tanto, exige-se uma grande quantidade de dados, devido ao número de graus de liberdade, tornando a aquisição demorada. O projeto não tem só como objetivo construir uma biblioteca, mas também tornar o processo mais eficiente, tentando reduzir a duração dos testes através de algoritmos mais eficientes, menor tempo no momento da aquisição e com menor erro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)

A BRDF é uma função com 5 variáveis, considerando uma superfície homogênea, ela representa como um objeto é visto em todas as direções. As variáveis são os ângulos de incidência e reflexão da luz em relação à superfície no plano zênite, os ângulos de incidência e reflexão da luz em relação à superfície no plano azimutal e o comprimento de onda. A tabela 1 resume as unidades utilizadas neste trabalho.

Tabela 1 – Unidades para medida da Luz

Símbolo	Nome	Unidade
L_r, L_i	Radiância	$Wm^{-2}sr^{-1}$
E_r, E_i	Irradiância	Wm^{-2}
f_r	BRDF	sr^{-1}

O sistema montado cobre o eixo zênite, assim, o sistema conta com 3 variáveis, onde o ângulo de incidência é variado pelo motor de passo com a lâmpada, e o ângulo

de reflexão é definido pelo outro motor, o comprimento de onda é variado pela troca de filtros de interferência no sensor.

Desconsiderando o comprimento de onda da luz, a BRDF pode ser definida pela razão entre a radiância refletida por uma superfície em uma direção " ω_r ", pela irradiância diferencial incidente em uma direção do vetor " i " da fonte de luz. Ou seja:

$$f_r(\omega_r \rightarrow \omega_i) = dL_r(\omega_r) / dE_i(\omega_i) \quad (2.1)$$

A irradiância incidente é a energia radiante sobre a área de uma superfície e pode ser definida como:

$$E_i = \int_{\Omega} L_i \cos \theta d\omega_i \quad (2.2)$$

Onde, Ω se refere a um ângulo sólido de uma semi-esfera onde será feito as medidas. Considerando que todos os raios incidentes são paralelos, então pode se reduzir para a fórmula:

$$E = E_0 \cos \theta \quad (2.3)$$

Onde E_0 se refere a irradiância perpendicular a superfície. Assim a BRDF pode ser reescrita como:

$$f_r(\omega_r \rightarrow \omega_i) = dL_r(\omega_r) / L_i \cos \theta d\omega_i \quad (2.4)$$

A partir dessa equação, chega-se na equação da refletância:

$$L_r(\omega_r) = \int_{\Omega} f_r(\omega_r \rightarrow \omega_i) L_i \cos \theta d\omega_i \quad (2.5)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Dispositivos

O sistema é formado por dois motores de passo de 18 Kgf.cm com resolução de 0,4° obtidos através de “drives” próprios controlados a partir de um computador desktop, com algoritmos na linguagem “C” (ver Figura 3.1). Estes motores estão conectados a dois braços metálicos que giram no eixo zênite tendo por centro uma mesa

ajustável, que possibilita que a superfície do material colocado sobre ela fique no centro do semicírculo onde os motores se movem.

Um dos braços dos motores contém uma lâmpada dicróica de 50 Watts, com foco no centro da mesa ajustável, e o segundo esta com uma lente também com foco no centro da mesa, que direciona a radiação refletida do material para uma fibra ótica, que está conectada a um fotodiodo da Oriel Instruments Modelo 70336 com filtros e um “chopper” para análise do comprimento de onda de interesse.

O fotodiodo esta conectado a um Sistema de Radiometra Mertlin Modelo 70100 que amplifica sinais de baixa intensidade e fornece uma resposta em Volts, que é enviada para um sistema de aquisição de dados NI-Daq 6210 na forma analógica e convertida em digital. Os dados são enviados a um computador Desktop para armazenar os dados.

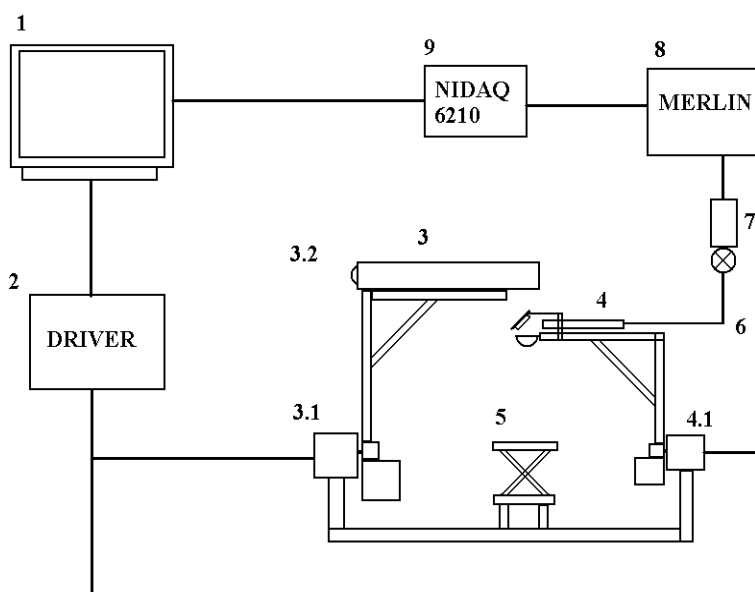


Figura 3.1 - Ilustração do sistema.

Onde:

1 – Desktop com algoritmo controlado pelo usuário para controle das sequências de movimento dos motores de passo. O algoritmo também recebe os dados e os organiza em tabelas.

2 – Driver que controla os motores de passo.

3 – Braço com uma fonte de luz dicróica de 50W (3.2), controlada por um motor de passo (3.1), que gira perpendicular ao plano da mesa (5).

4 – Braço com uma lente e uma fibra ótica, que recebe a luz refletida da mesa (5), controlada por um motor de passo (4.1), que gira perpendicular ao plano da mesa (5).

5 – Mesa ajustável onde são colocadas as amostras.

6 – Fibra ótica que transporta a luz refletida para o sistema de filtros e chopper (7).

7 – Chopper que gira a uma frequência determinada e um detector com filtro para um comprimento de onda de interesse.

8 – Sistema de detecção Merlin, que gera uma resposta analógica em forma de potencial elétrico.

9 – Sistema de conversão dos sinais analógico enviado pelo detector em digital, para recebimento do computador (1).

3.2 Caracterização do sistema

O sistema foi caracterizado em função do spot da lâmpada usada, da intensidade, do comprimento de onda e da distribuição espacial da luz. Para tanto foi medido o tamanho dos spots para cada ângulo de incidência da lâmpada. Foram feitos ajustes mecânicos no sistema para melhorar a simetria e homogeneidade do spot. A figura 3.2.1 mostra como varia o tamanho do spot em função do ângulo de incidência da luz.

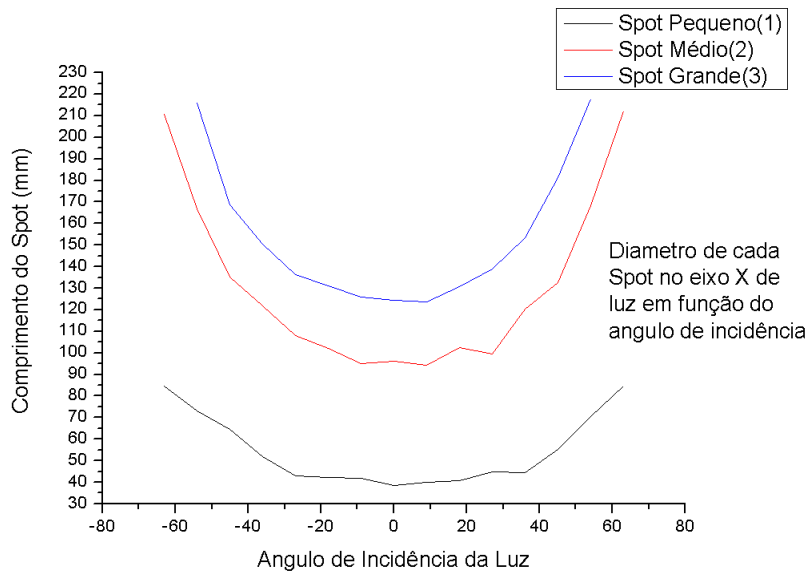


Figura 3.2.1 – Diâmetro dos spots da lâmpada.

Também foi caracterizada a variação da intensidade da iluminação sobre a superfície em relação ao centro em dois eixos sobre o plano (figuras 3.2.2 e 3.2.3).

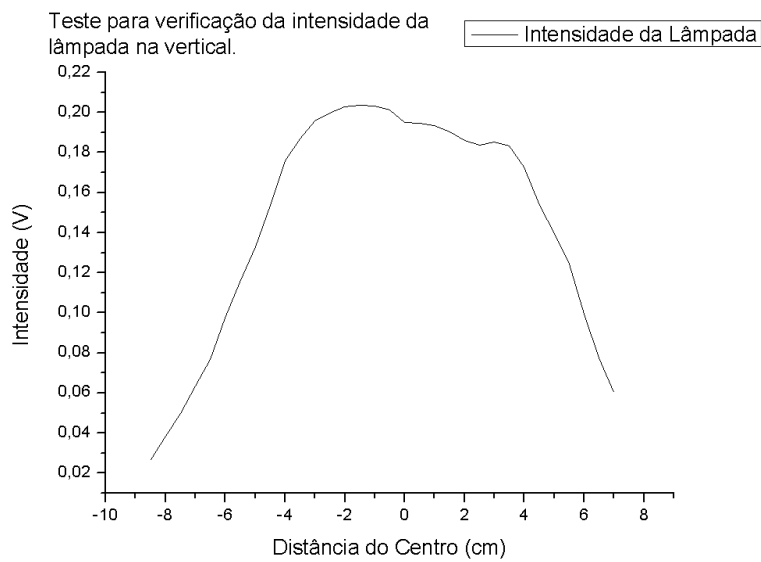


Figura 3.2.2 – Intensidade da radiação sobre a mesa na direção x.

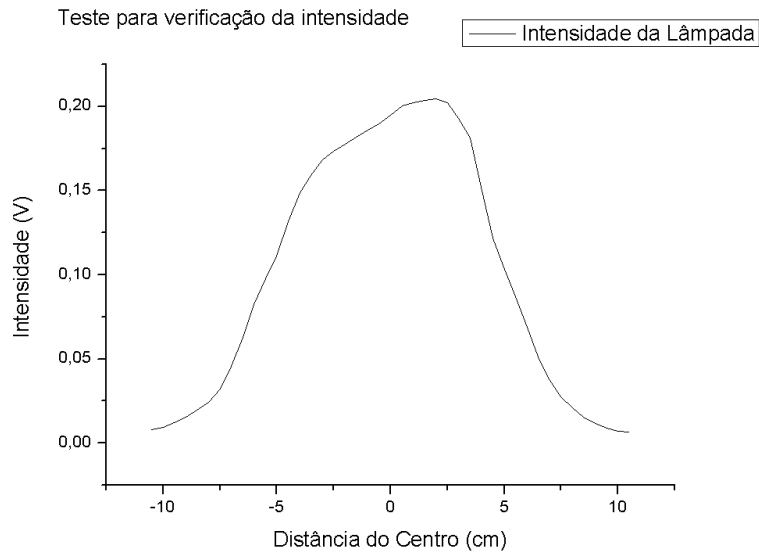


Figura 3.2.3 – Intensidade da radiação sobre a mesa na direção y (perpendicular a direção x).

Percebe-se que a intensidade é maior na posição de 5 cm do centro da superfície. Este problema se deve ao fato de ser uma lâmpada comercial que não tem compromisso com a distribuição espacial do feixe.

Foi feito uma medida para encontrar o espectro da luz emitida pela lâmpada, onde se chegou ao gráfico da figura 3.2.4.

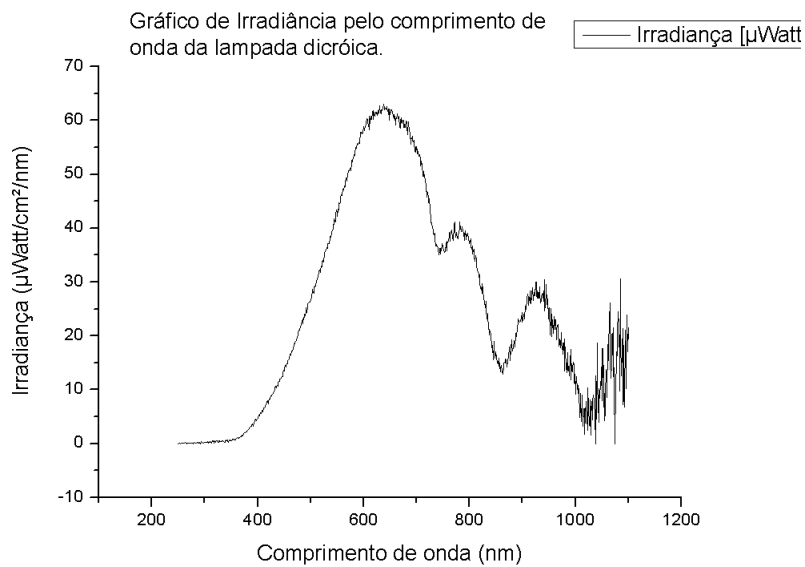


Figura 3.2.4 – Irradiância da lâmpada para cada comprimento de onda.

Percebe-se que a lâmpada tem maior intensidade entre os comprimentos de onda 500nm e 700nm, assim, colocou-se um filtro de 549,5 nm entre o chopper e a fibra ótica para as medidas.

Também houve ajustes no braço do sensor, pois ele estava apresentando desvio em relação ao centro o que causava erros nos valores das medidas. A figura 3.2.5 mostra este desvio em função do ângulo de medida antes dos ajustes e a figura 3.2.6 mostra o diâmetro da região de observação da fibra sobre a mesa em função do ângulo depois dos ajustes.

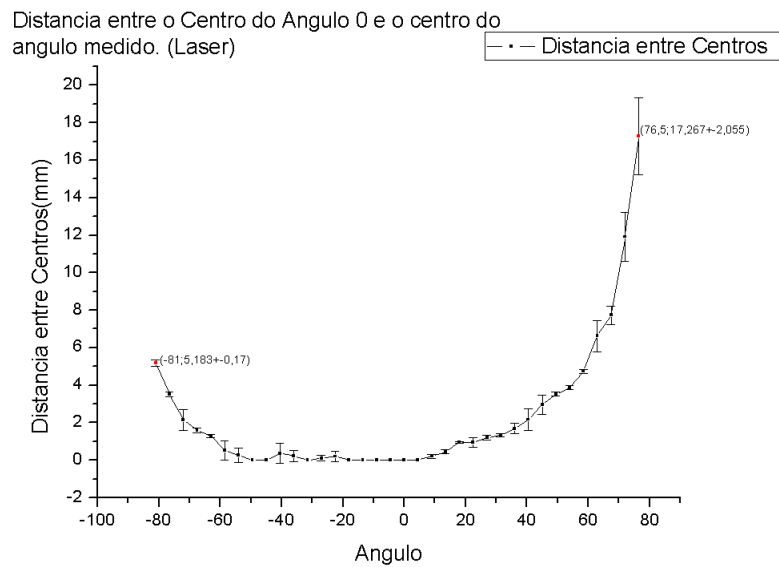


Figura 3.2.5 – Distância entre os centros do spot de observação do detector em relação ao do centro do spot a 0°.

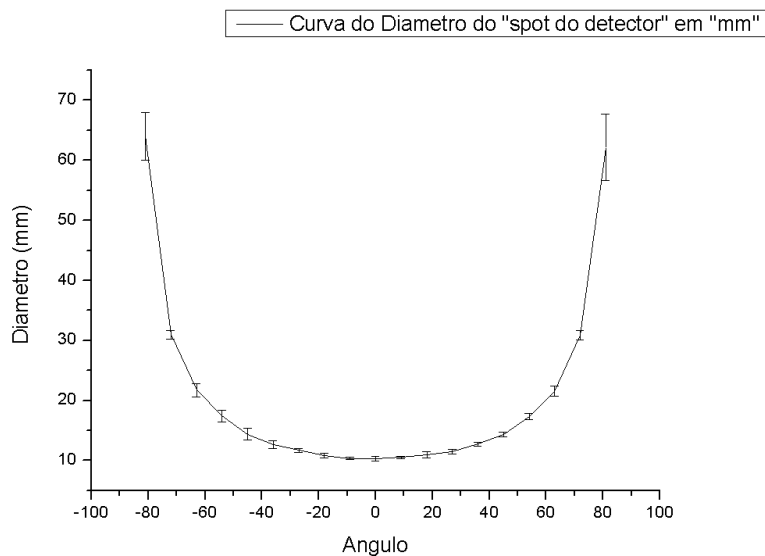


Figura 3.2.6 – Diâmetro do spot detector pelo ângulo de reflexão após ajuste.

Percebe-se que a área que o sensor capta abrange de forma mais simétrica, depois dos ajustes.

3.3 Metodologia

Assim que todos os equipamentos estão ligados, através do programa em linguagem "C" no desktop, ajustam-se os motores para que os braços fiquem perpendiculares ao plano da mesa. Em seguida coloca-se os intervalos em que os braços atuaram no semi-círculo. A medição começa com as medidas de um padrão, depois a medida de escuro, e depois o mesmo para um material de interesse. Assim, o programa gera um arquivo em formato "txt" com tabelas com os dados das medidas e uma tabela com a razão dos valores do material escolhido pela medida do padrão.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Perfis de Refletância

Os perfis de refletância seguem alguns padrões, que são difuso (totalmente espalhado), espelhado (como no caso de um espelho) e acetinado (espalhamento da luz em uma direção preferencial). O padrão de refletância, material chamado spectralon,

apresenta uma natureza difusa, ou seja, ele distribui a luz refletida igualmente em todas as direções como pode ser observado na figura 4.1.

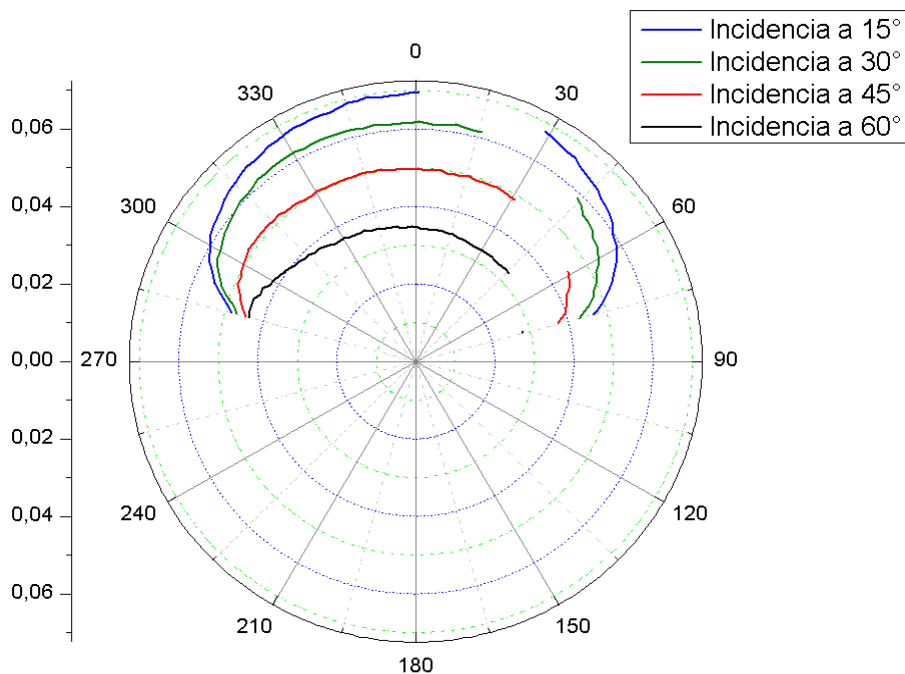


Figura 4.1 – Valores típicos obtidos para o Padrão durante as medidas dos diversos materiais.

As medidas demonstram a característica difusa da luz refletida pelo spectralon. Percebe-se que a intensidade cai quanto mais próximo de 90° seguindo a equação (2.3), onde a irradiância depende do cosseno do ângulo incidência.

A seguir são mostrados os resultados obtidos com alguns materiais. A primeira medida foi com grafite (figura 4.2):

Teste com grafite, dia 21-05-13

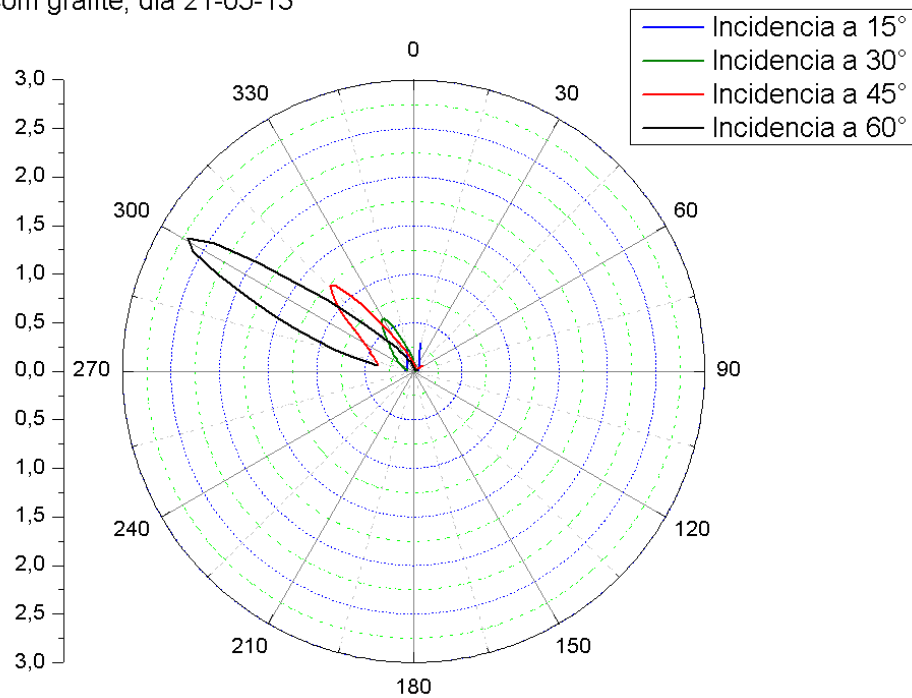


Figura 4.2 - Valores para o teste com Grafite.

Percebe-se a natureza direcional da luz, que incide numa direção e se espalha na direção oposta, este é um comportamento acetinado, ou seja, a luz é se espalha seguindo em uma direção preferencial. Percebe-se também, absorção da luz por parte do grafite, devido a sua cor escura.

Teste com alumínio anodizado dia 27-05-13

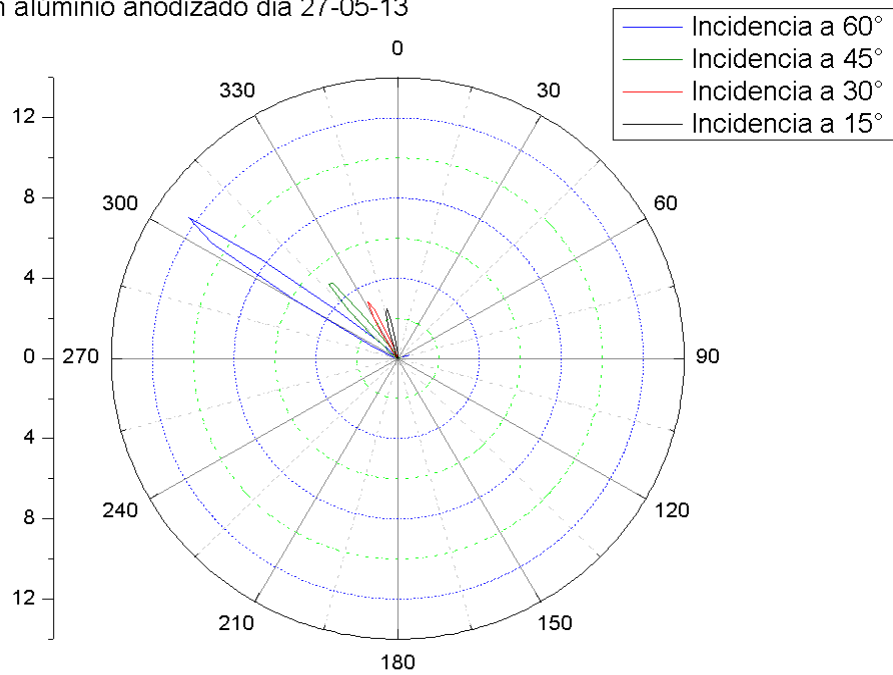


Figura 4.3 - Valores para o teste com Alumínio anodizado.

A medida com alumínio anodizado (figura 4.3) também apresenta um caráter direcional, e muito pouco espalhamento da luz em outras direções, além disso, percebe-se que há menos absorção da luz que no caso do grafite.

Teste dia 04/06/2013 - Valores para Aço Inox pintado.

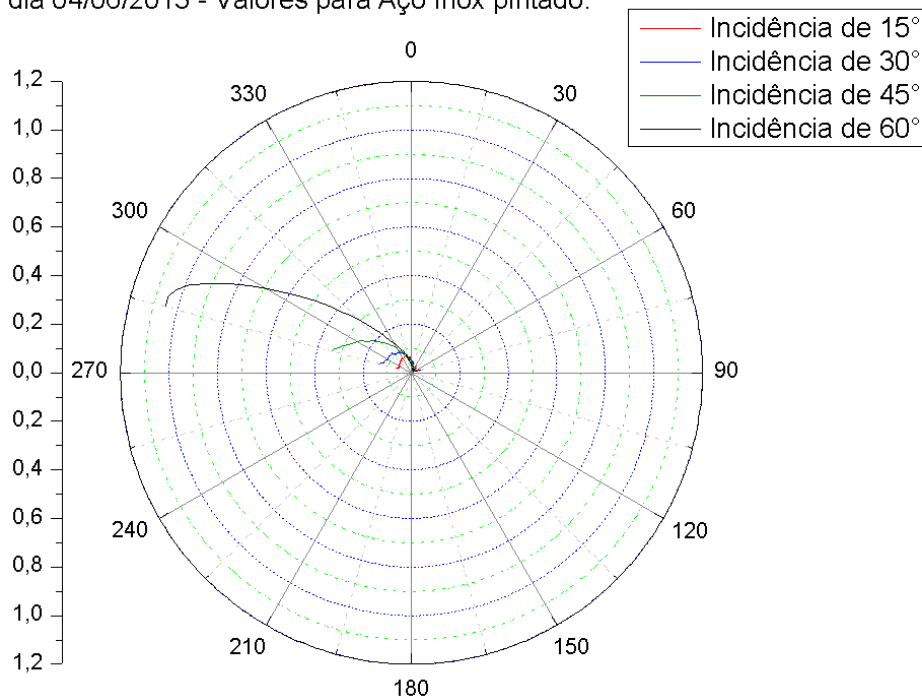


Figura 4.4 - Valores para o teste com Aço Inox pintado.

O teste do aço inox pintado (figura 4.4) mostra um espalhamento maior da luz, porém ainda direcional. Também apresenta grande absorção da luz.

Teste dia 10/06/13 com Alumínio, valores da razão medidas do material/medidas do padrão.

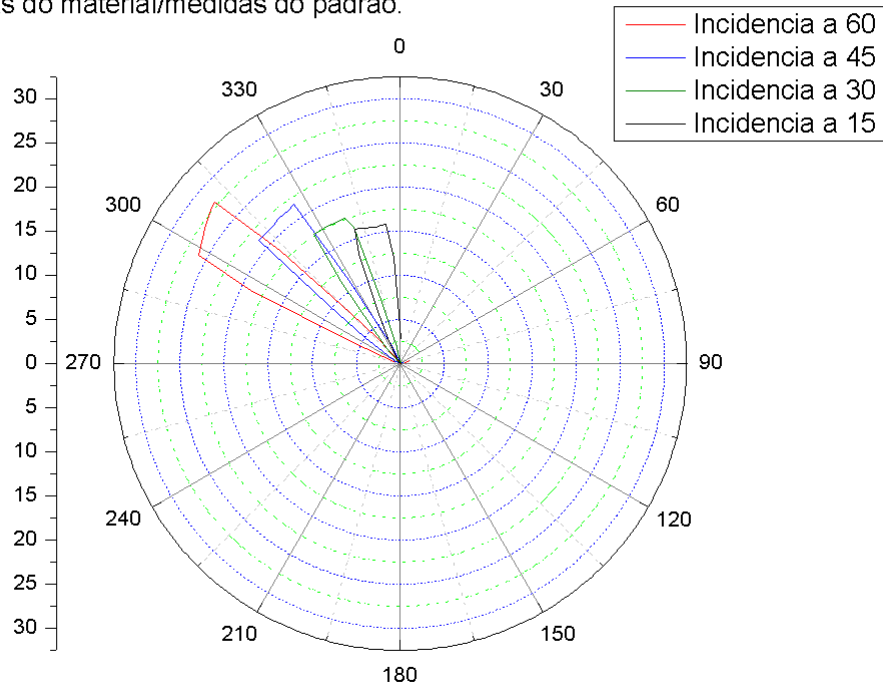


Figura 4.5 - Valores para o teste com Alumínio.

Teste dia 11-06-13 espelho, valores da razão material-padrão

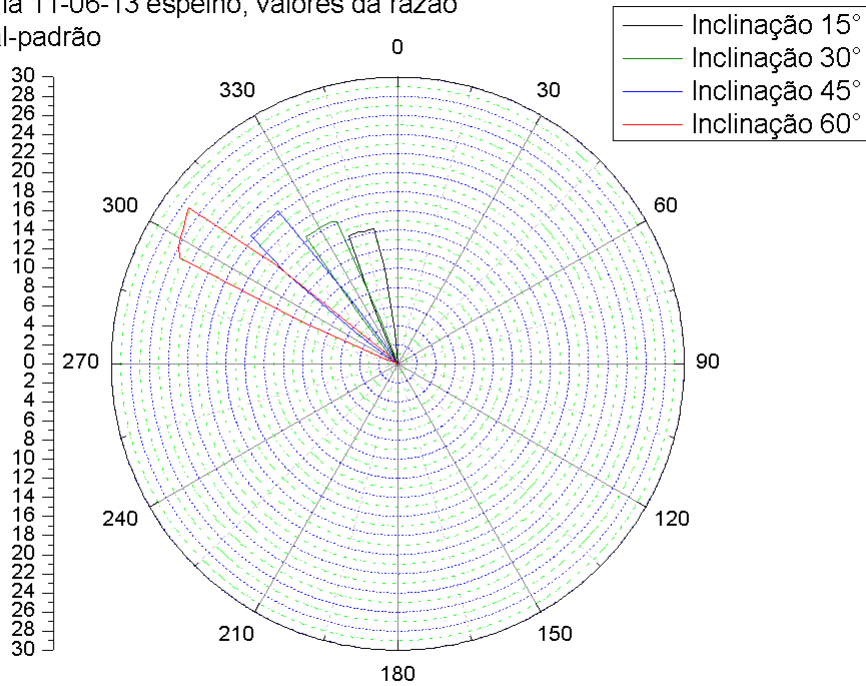


Figura 4.6 - Valores para o teste com Espelho.

O teste com alumínio e o teste com espelho apresentam valores bem semelhantes.

Possivelmente devido a pouca absorção da luz por estes materiais, ocorreu saturação do sistema sensor e os valores podem não representar a realidade. Estas medidas deverão ser repetidas utilizando filtro neutro para diminuir a irradiância incidente.

Os testes duraram em média uma hora e quarenta minutos, o que demonstra a necessidade de melhorar o sistema de medição.

5 CONCLUSÃO

O sistema está funcionando como esperado, e foi possível perceber características reflexivas dos materiais testados. Porém ainda está consumindo bastante tempo, pois o projeto prevê medidas em 3 dimensões, e assim o tempo necessário para o teste crescerá consideravelmente.

Como próximo passo, pretendemos fazer várias medidas de perfis de refletância e comparar os resultados com modelo teórico.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Acessado em: <http://search.newport.com/?q=70336NS> Data: 04/02/2013
- [2] Acessado em: http://search.newport.com/?q=*&x2=sku&q2=70100 Data: 04/02/13.
- [3] Acessado em: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/203223> Data: 04/02/13.
- [4] Acessado em: <http://www.labsphere.com/products/reflectance-standards-and-targets/reflectance-targets/spectralon-targets.aspx> Data: 04/02/13.
- [5] KE, L. A **Method of Light Reflectance Measurement**. 1993. 65f. Tese. Tsinghua University. Vancouver, BC Canada, 1993
- [6] BILIOURIS, D. A **Compact Laboratory Spectro-Goniometer (CLabSpeG) to**

Assess the BRDF of Materials. Presentation, Calibration and Implementation on Fagus sylvatica L. Leaves. 2007.

[7] COHEN, M. F. WALLACE, J. R. **Radiosity and Realistic Image Synthesis.** Boston, San Diago, New York, London, Syndey, Tokyo, Toronto: Academic Press Profissional, 1993. 381 p..

Mário Salgado Ribeiro
Bolsista PIBIC/CNPq

Luiz Angelo Berni
Orientador LAS/CTE/INPE